第46卷 第3期
2023年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 3
Mar. 2023

渭河流域生境质量时空演变及其地形梯度效应与影响因素

程 静[1]， 王 鹏[2]， 陈红翔[1]， 韩永贵[1]

（1. 宁夏师范学院政治与历史学院，宁夏 固原 756000；2. 宁夏大学地理科学与规划学院，宁夏 银川 750021）

摘 要：生境质量是关乎人类福祉和区域可持续发展的重要基础，对保护生物多样性、提升生态系统服务功能以及构建区域生态安全格局具有重要意义。基于2000—2020年3期土地利用数据，综合应用InVEST模型、地形位指数、地理探测器及空间统计分析等方法，对渭河流域生境质量空间分布特征及其地形梯度效应与影响因素进行综合分析。结果表明：(1) 2000—2020年渭河流域生境质量指数呈逐年增加态势，由0.607增长至0.624，增长幅度为2.463%，空间上呈现出两极化分布格局，低等和高等生境质量面积持续增加，而中等和良好生境质量面积有所下降。(2) 渭河流域生境质量空间分布受地形因素影响较大，具有显著的地形梯度效应，低等生境质量在低地形梯度上分布广泛，分布指数最高，而高等生境质量在高地形梯度上占据主导优势。(3) 土地利用类型是渭河流域生境质量空间分异的主要影响因素，且任意2个因子对生境质量空间分异的交互作用均大于单个驱动因子的作用，土地利用类型与降雨量、气温、海拔、归一化植被指数的交互决定力均大于0.6。研究结果可为渭河流域可持续发展以及生态保护与高质量发展提供科学的理论支撑与决策支持。

关 键 词：生境质量；InVEST模型；地形梯度效应；影响因素；地理探测器；渭河流域

文章编号：1000-6060(2023)03-0481-11(0481～0491)

生境质量是指生态系统为生物提供可持续生存条件的能力，可以反映出区域生物多样性状况[1-2]，是维持生态系统稳定的重要指标，关乎区域可持续发展和人类福祉[3]。生境质量评估是衡量区域生态系统健康的重要手段，也是区域生态安全网络构建和生态文明建设的参考依据。自地球进入“人类世”新纪元以来，自然生境面临着由人类活动引起的土地利用方式、强度及格局的改变导致的萎缩和碎片化问题[4-5]，造成生物多样性下降，引发严重的社会和生态危机[6]。因此，基于土地利用视角研究区域生境质量格局状况，对改善生态安全格局、提升人类福祉，实现区域可持续发展具有重要意义。

随着全球范围内对生物多样性问题的广泛关注，生境质量评估成为国内外生态学者研究的热点问题。早期的生境质量评估以经济发展和人类社会活动为出发点，通过实地调查或构建指标体系等方法研究人类行为对生境质量的影响，该方法虽具有较高的准确性，但耗时耗力，仅适用于样点或样带等小尺度调查[7-8]，在流域、区域尺度上难以实现，且无法实现长时间序列的综合评估[9]。随着地理信息技术的开发与应用，基于遥感产品的Maxent模型、SolVEST模型以及InVEST模型等生态模型被广泛地应用于生境质量评估，为实现大区域尺度的生境质量评估提供了技术保障[10-11]。其中，基于土地利用的InVEST模型由于其数据易得，操作简便，能够反映土地利用变化对生境质量的影响等优势被国内外学者广泛应用于县域、流域以及区域等不同尺度的生境质量评估[11-13]，为区域生态保护提供了

收稿日期：2022-07-08； **修订日期：**2022-09-14

基金项目：宁夏自然科学基金(2022AAC03324)；宁夏师范学院校级科学基金(重点B类)(NXSFZDB2113)资助

作者简介：程静(1995-)，女，硕士，助教，主要从事生态经济与生态评估研究. E-mail: 958830559@qq.com

通讯作者：陈红翔(1979-)，男，博士，副教授，主要从事区域经济发展研究. E-mail: 670577976@qq.com

重要参考。但总结发现,相关研究多关注生境质量的时空演变特征及其与城市化、土地利用和景观格局的互作关系[14-15],对生境质量随地形梯度变化的研究不够深入[11]。而地形作为重要的自然地理要素,与生境质量存在着紧密的内在联系,是影响生态系统服务空间格局分异的重要因子[16]。尽管已有研究对生境质量的地形梯度效应进行了探讨[3,11,16],但仍局限于单个地形因子的具体分析,无法体现地形因子的综合作用过程,而基于多地形因子的地形位指数能够综合反映多种地形因子的耦合作用过程以及地形条件的空间分异特征,可以有效表达地形因子对地理事物的综合影响程度。特别是地形地貌复杂的流域,其生物多样性受地形影响较为明显,从地形视角进行生境质量评估有助于认识生境质量的时空分异机制及生态系统管理的有效开展。

渭河流域是我国重要的生态屏障区和重要的生物多样性保护区,在维持西北地区生态平衡及社会经济发展方面具有重要的战略地位[17]。同时,该区域也是我国扶贫开发和乡村振兴的重点区域,在快速的城市化和工业化发展下,资源开发与生态保护矛盾突出。如何在乡村振兴和生态保护双重背景下,维系渭河流域的生境质量稳定,是渭河流域实现高质量发展亟需解决的现实问题。因此,本研究基于InVEST模型,结合地形位指数和地理探测器模型综合研究渭河流域2000、2010年和2020年生境质量的时空演变特征,从多种地形因子视角探索其生境质量的地形梯度效应,并识别其生境质量空间分异的影响因素,以期为区域生物多样性保护和生态安全格局构建提供科学参考依据。

1 研究区概况

渭河(104°01′~110°21′E,33°50′~37°18′N)发源于甘肃省渭源县的鸟鼠山,地处我国西北地区,是黄河流域最大的支流,其地跨陕西、甘肃和宁夏三省(区),流域总面积约13.4×10^4 km^2。渭河流域地势西高东低,属于大陆性季风气候区,年均气温8~14 ℃,年均降水量550~850 mm,受地形影响,降水分布不均,呈东南向西北递减趋势。渭河流域北部和西部地处我国集中连片特困区,生态环境脆弱,社会经济发展缓慢,随着扶贫和生态工程的持续推进,区域社会经济发展和生态环境稳步提升,但生

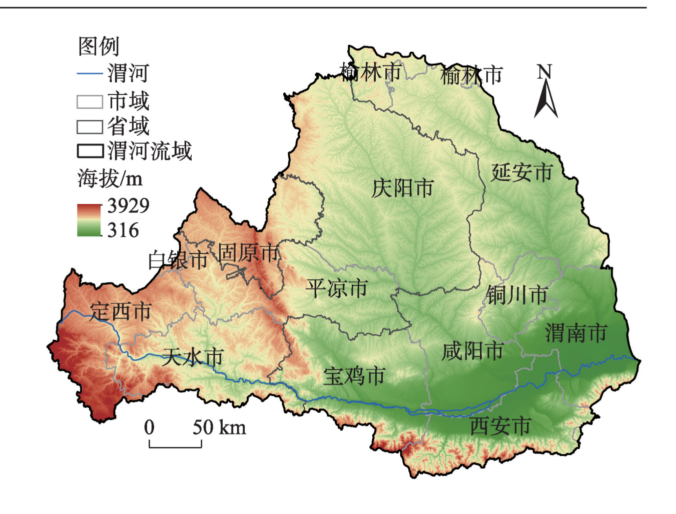


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

态系统稳定性仍需提高;中部是地势平坦、人口集中且经济发展较快的平原地区,人类活动频繁,人地关系矛盾突出;南部是秦岭山区,植被覆盖度高,生态环境质量良好。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究所用数据主要包括土地利用数据和生境质量影响因素数据。其中,2000、2010年和2020年3期土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.redc.cn),空间分辨率为30 m,并将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6大类。生境质量影响因素主要包括海拔、坡度、归一化植被指数(NDVI)、降水、气温、土地利用类型以及人口密度、地区生产总值(GDP)和土地利用程度。其中,数字高程模型(DEM)数据和NDVI数据来源于地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn/),海拔和坡度由DEM计算获得;降水和气温来源于国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn);人口密度数据来源于Worldpop网站(http://www.worldpop.org/);GDP数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.redc.cn)。土地利用程度计算参考文献[18]中方法进行计算。研究区行政边界来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.redc.cn)。

2.2 基于InVEST模型的生境质量评估模型

本文采用InVEST模型中的生境质量模块(Habitat quality)评估渭河流域生境质量状况。该模块可

以反映人类活动对环境造成的影响程度[19]，其基本原理是将不同土地利用类型视为相应的生态系统类型或人为活动干扰因子，依据各生态系统类型对动植物的生境适宜度和人类干扰因子的威胁强度来模拟和评估生境质量[20]。其计算公式为：

$$D_{xj}=\sum_{1}^{r}\sum_{1}^{y}\left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^{n}w_r}\right)r_y i_{rxy}\beta_x S_{jr} \tag{1}$$

$$Q_{xj}=H_{xj}\left[1-\left(\frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2+k^2}\right)\right] \tag{2}$$

式中：D_{xj}为生境退化度，取值为[0, 1]，该值越大，说明生境退化程度越高；r为威胁因子；y为威胁因子r对应的栅格数量；w_r为威胁因子的权重；r_y为威胁因子的胁迫值；β_x为生境受保护水平；S_{jr}为生境j对胁迫因子r的敏感性；i_{rxy}为栅格y中的威胁因子r对栅格x的影响；Q_{xj}为生境质量；H_{xj}为生境适宜度；k为半饱和参数，通常取生境退化度最大值的一半。

本文根据渭河流域实际情况及相关研究成果，将人类干扰强度大的城镇用地、农村居民点、其他建设用地、耕地以及未利用地设置为生境质量的威胁因子，并基于InVEST模型使用指导手册以及相关研究成果来设定其权重、最大影响距离以及退化类型（表1），提取威胁因子图层；进一步设定不同地类的生境适宜性及对威胁因子的相对敏感性（表2）。

2.3 地形梯度分析法

地形因素是影响地理事物空间分布及其发生发展的关键因素[21]。地形位指数是分析空间任意一点海拔和坡度属性信息的复合地形因子，可以表达出地形条件的空间分异特征，采用地形位指数可以综合分析地形因素对生境质量空间分布格局的影响[16,22]，其计算公式为：

表1　威胁因子最大影响距离及权重

Tab. 1　Maximum influence distance and weight of threat factors

威胁因子	最大胁迫距离/km	权重	空间衰退类型
城镇用地	10	1.0	指数
农村居民点	8	0.6	指数
其他建设用地	9	0.7	指数
耕地	4	0.6	线性
未利用地	6	0.5	线性

$$T=\ln\left[\left(\frac{E}{\bar{E}}+1\right)\times\left(\frac{S}{\bar{S}}+1\right)\right] \tag{3}$$

式中：T为地形位指数；E和$\bar{E}$分别为空间上任一栅格的海拔和平均海拔(m)；S和$\bar{S}$分别为空间上任一栅格的坡度和平均坡度(°)。

为了更好地分析渭河流域生境质量的地形梯度效应，本文引入生境质量的地形分布指数来探讨生境质量随地形因子变化的空间分布特征[23]，其计算公式为：

$$P=\frac{S_{ie}}{S_i}\Big/\frac{S_e}{S} \tag{4}$$

式中：P为分布指数；S_{ie}为第e级地形梯度下第i级生境质量的面积(km^2)；S_i为第i级生境质量的总面积(km^2)；S_e为第e级地形梯度的总面积(km^2)；S为研究区总面积(km^2)。

2.4 地理探测器模型

地理探测器是由王劲峰等[24]创建的一种用于分析地理现象空间异质性并揭示其驱动因素的统计学方法。与其他模型相比，该模型考虑了因素之间的空间异质性，被广泛地应用在疾病防治和生态环境治理中[25]。其计算公式为：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{5}$$

表2　不同土地利用类型对生境威胁因子的敏感度

Tab. 2　Sensitivity of different land use types to habitat threat factors

土地利用类型	生境适宜度	胁迫因子敏感度				
		城镇用地	农村居民点	其他建设用地	耕地	未利用地
耕地	0.3	0.8	0.6	0.7	0.0	0.4
林地	1.0	0.8	0.7	0.5	0.6	0.2
草地	0.9	0.7	0.5	0.6	0.8	0.6
水域	0.7	0.7	0.6	0.7	0.5	0.4
建设用地	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
未利用地	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.0

式中：q 为生境质量影响因素的探测值，取值为[0, 1]；h 为自变量的分类序号；L 为评价单元的总数；N_h 和 N 分别为每个分区和区域内总数目；σ_h^2 和 σ_h 分别为每个分区的方差和区域内生境质量的总方差。

为进一步探讨渭河流域生境质量空间分异格局的成因，需要对不同驱动因子进行离散化分级处理，然后导入地理探测器进行运算。驱动因子离散化分级处理具体如表3所示。

3 结果与分析

3.1 渭河流域生境质量时空演变特征

3.1.1 生境质量时序变化分析 由表4和图2可知，2000—2020年渭河流域生境质量指数由0.607增长至0.624，呈逐年增加态势，年均增长率为0.128%。其中，高等和中等生境质量面积分布最为广泛，两者占总面积的94%以上，而低等和良好生境质量面

表3 地理探测器的驱动因子分级说明

Tab. 3 Description of the driving factors classification of geographic detector

驱动因子	分级方法	级别	级别说明
归一化植被指数(NDVI)	郭帅[26]	1~6	1:≤0.2;2:0.2~0.3;3:0.3~0.4;4:0.4~0.5;5:0.5~0.6;6:>0.6
坡度(SL)/(°)	NaturalBreaks	1~6	1:0~5;2:6~10;3:11~15;4:16~20;5:21~25;6:>25
海拔(EL)/m	NaturalBreaks	1~6	通过ArcGIS 10.2的Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Reclass工具提取
气温(TEM)/℃	NaturalBreaks	1~5	通过ArcGIS 10.2的Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Reclass工具提取
降水(PRE)/mm	NaturalBreaks	1~5	通过ArcGIS 10.2的Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Reclass工具提取
土地利用类型(LUT)	程静[27]	1~6	通过ArcGIS 10.2的Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Reclass工具提取
土地利用程度(LUD)	NaturalBreaks	1~5	通过ArcGIS 10.2的Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Reclass工具提取
人口密度(POP)/人·km^{-2}	葛美玲[28]	1~5	1:0~60;2:61~150;3:151~300;4:301~500;5:>500
地区生产总值(GDP)/元	NaturalBreaks	1~5	通过ArcGIS 10.2的Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Reclass工具提取

表4 渭河流域不同等级生境质量面积及占比变化

Tab. 4 Changes of habitat quality areas and proportions of different grades in the Weihe River Basin

生境质量等级	2000年		2010年		2020年	
	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%
低等	3879.74	2.89	4660.38	3.47	5388.63	4.02
中等	58799.54	43.81	55990.10	41.72	54379.37	40.52
良好	2838.23	2.12	2483.82	1.85	2460.84	1.83
高等	68688.38	51.18	71071.59	52.96	71977.05	53.63
生境质量平均值	0.607		0.619		0.624	

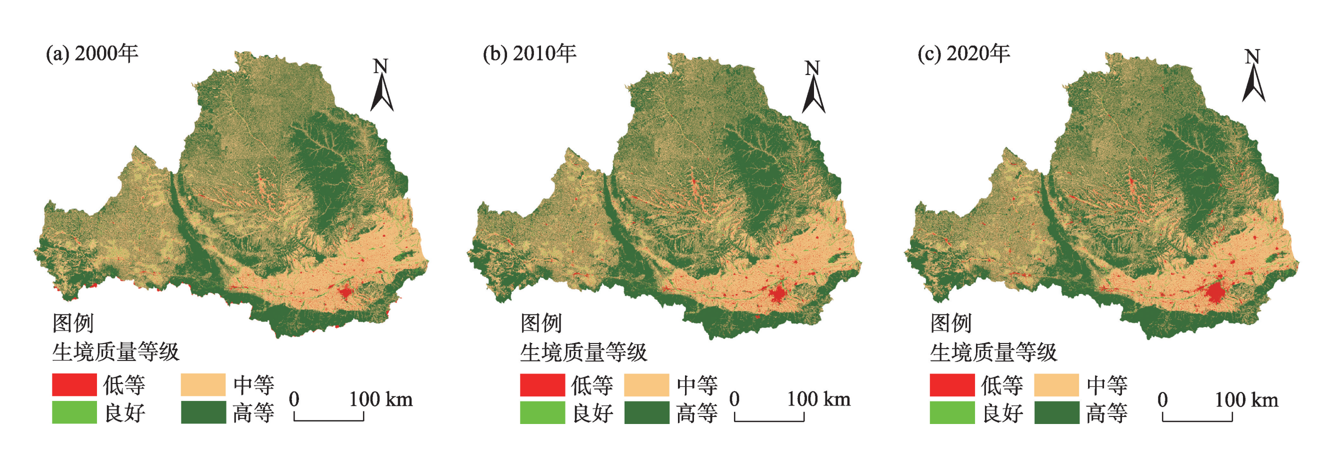


图2 2000—2020年渭河流域生境质量空间分布格局

Fig. 2 Spatial distribution patterns of habitat quality in the Weihe River Basin from 2000 to 2020

积占比较少，不足6%，这说明渭河流域生境质量水平总体较高。2000—2020年渭河流域低等和高等生境质量面积持续增加，分别增加1508.89 km²和3288.67 km²，其面积占比分别增加了1.13%和2.45%，而中等和良好生境质量面积呈逐年下降趋势，分别减少4420.17 km²和377.39 km²，其面积占比分别降低了3.29%和0.29%。研究期间，渭河流域生境质量整体处于中等偏上水平且呈现逐年增加态势，表明流域生态环境治理取得良好成效。

3.1.2　渭河流域生境质量空间变化分析　由图2可知，2000—2020年渭河流域不同等级生境质量空间分布格局具有明显的异质性特征。低等生境质量主要集中分布在关中平原城市群、河川河谷建成区以及城市市区周围等人类活动密集区域，其他地区亦有少量分布，该类地区土地利用类型以建设用地为主。中等生境质量主要分布在渭河流域北部和西部以及东南部的农业生产区，该类地区生境质量退化较为严重，土地利用类型以耕地为主；而高等生境质量分布最为广泛，且集中分布在秦岭北麓、六盘山和子午岭等地区，该类地区土地利用类型以林地和草地为主，自然生态环境稳定且受人类活动干扰较小。

从图3和表5中可以看出，2000—2010年生境质量稳定型区域分布广泛，其面积占比接近95%，主要集中分布在秦岭北麓、子午岭以及关中平原地区；改善型区域面积为3915.71 km²，其中缓慢改善区与快速改善区分别为82.27%和17.73%，主要分布在渭河流域中部平凉市和庆阳市、北部延安市以及

表5　2000—2020年渭河流域生境质量面积及占比变化

Tab. 5　Changes of habitat quality areas and proportions in the Weihe River Basin from 2000 to 2020

类型	2000—2010年		2010—2020年	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
快速退化型	348.07	0.26	994.03	0.74
缓慢退化型	2581.92	1.92	7207.75	5.37
稳定型	127360.19	94.89	117630.79	87.65
缓慢改善型	3221.43	2.41	7415.45	5.53
快速改善型	694.28	0.52	957.87	0.71

西部定西市等地区，其分布范围与退耕还林还草区域高度契合；退化型区域面积为2929.99 km²，其中缓慢退化区与快速退化区分别为88.12%和11.88%，主要分布在建成区周围地区。2010—2020年生境质量稳定型区域面积有所下降，但其分布仍旧广泛，空间格局发生明显改变。其中，改善型区域面积大幅增加，占比由2.93%增加至6.24%，主要集中分布在渭河流域甘肃段境内以及陕北地区，其他地区亦有少量分布。与此同时，退化型区域面积快速增加，占比由2.18%增加至6.11%，主要集中分布在平原和河川河谷等人类活动强烈的城市及周边地区，受人类活动影响，该类地区生境质量退化严重，生境破碎化程度加剧，亟需采取有效手段改善生境质量。

3.2　渭河流域生境质量的地形梯度效应

从海拔梯度分布指数来看(图4)，低等和中等生境质量随海拔梯度的增加呈下降趋势，且均在第1梯度时分布指数最大，2020年分布指数分别为

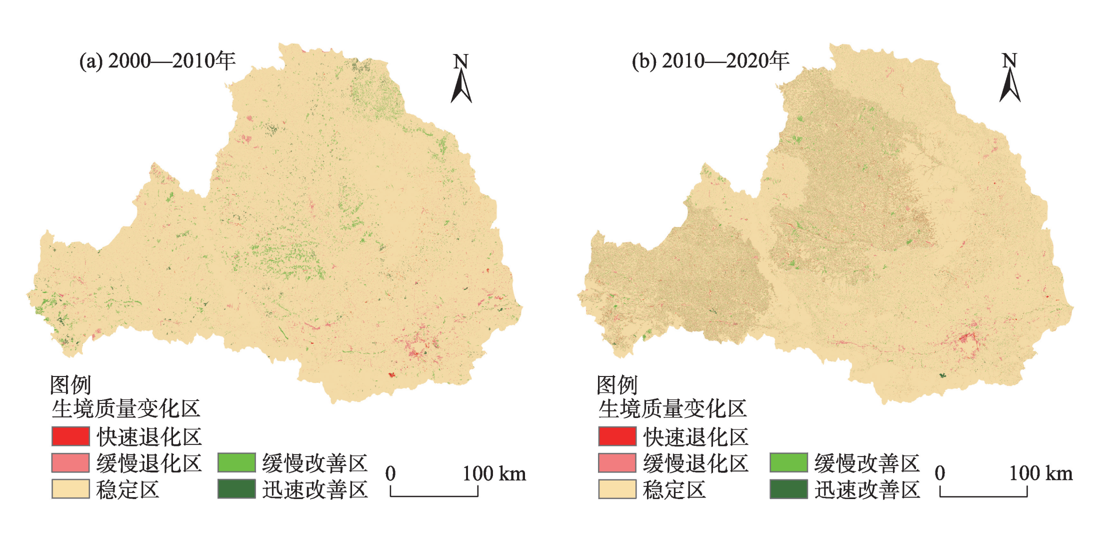


图3　2000—2020年渭河流域生境质量空间变化

Fig. 3　Spatial changes of habitat quality in the Weihe River Basin from 2000 to 2020

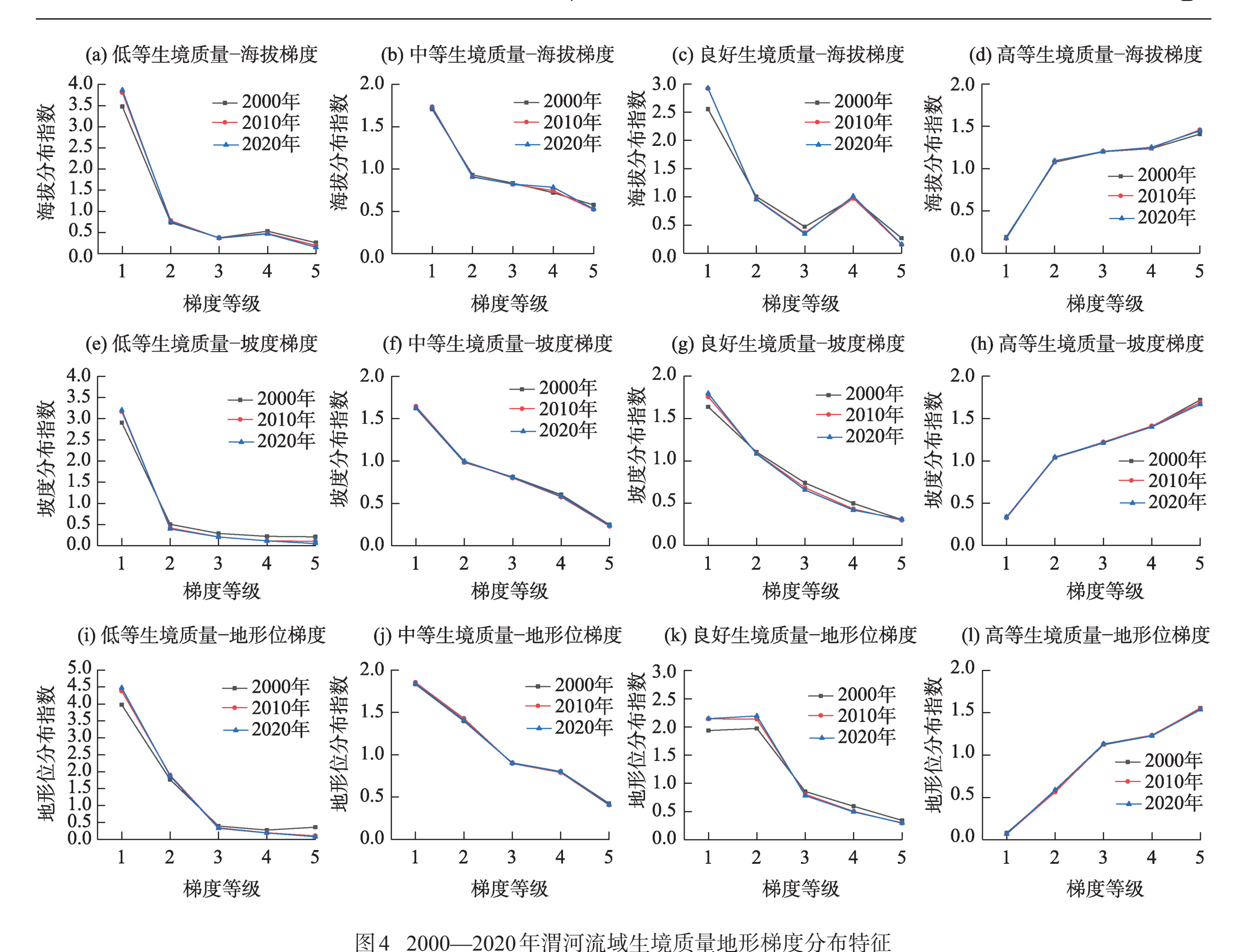


图4 2000—2020年渭河流域生境质量地形梯度分布特征

Fig. 4 Terrain gradient distribution characteristics of habitat quality in the Weihe River Basin from 2000 to 2020

3.87和1.73；良好生境质量随海拔梯度的增加呈波动下降变化趋势，且在第1、2和4梯度上具有较大的分布优势；而高等生境质量的分布优势主要集中在第3、4和5梯度上，但其分布指数不大，最高分布指数仅为1.46。从坡度梯度分布指数来看，不同等级生境在坡度梯度上的分布具有较大差异性，其中低等级生境质量在第1梯度上具有绝对的分布优势，最大分布指数为3.20，且呈逐年增加趋势；中等和良好生境质量随坡度梯度的增加，分布指数呈逐年下降趋势，且在第1和2梯度上具有显著的分布优势，分布指数均大于1；而高等生境质量在第3、4和5梯度上具有较大的分布优势，且随坡度梯度增加分布优势增强。研究期间，不同等级生境质量在坡度梯度上的分布变化幅度不明显。从地形位梯度分布指数来看，不同等级生境质量空间分布差异显著，其中低等生境质量集中分布在第1和2梯度上，最大分布指数分别为4.47和1.89，且随梯度增加呈快速下降趋势；中等生境质量主要分布在第1梯度上，其最大分布指数为1.84，随梯度增加同样呈快速下降趋势；良好生境质量主要集中分布在第1和2梯度上，且第2梯度分布指数大于第1梯度；高等生境质量在第3、4和5梯度上具有较大的分布优势，而在第1和2梯度上分布优势较弱，且随地形位梯度增加其分布指数快速上升。研究期间，低等生境质量在低地形位梯度上的分布优势有所增强，而中等和良好生境质量在低地形位梯度上的分布优势逐渐减弱。

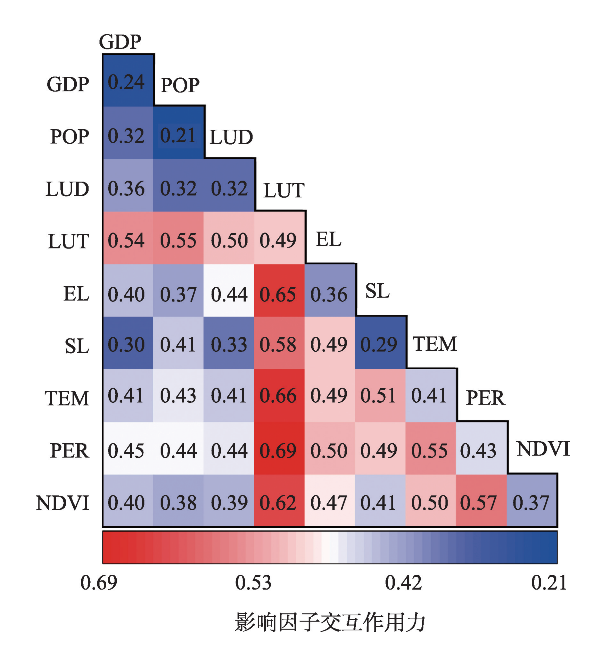
3.3 渭河流域生境质量空间分异影响因素

由表6和图5可知，土地利用类型对生境质量的决定力明显高于其他因素，为0.49，是生境质量空间分异的主要影响因素，其次是降水和气温，分别为0.43和0.41，而GDP和人口密度的决定力最小，分别为0.24和0.21，这也说明自然因素对生境质量的影响程度强于社会经济因素。从交互作用来看，

表6　生境质量空间分异影响因素探测值

Tab. 6　Detection values of influencing factors of spatial differentiation of habitat quality

影响因素	归一化植被指数（NDVI）	降水（PRE）	气温（TEM）	坡度（SL）	海拔（EL）	土地利用类型（LUT）	土地利用程度（LUD）	人口密度（POP）	地区生产总值（GDP）
q值	0.37	0.43	0.41	0.29	0.36	0.49	0.32	0.21	0.24



注：GDP为地区生产总值；POP为人口密度；LUD为土地利用程度；LUT为土地利用类型；EL为海拔；SL为坡度；TEM为气温；PER为降水；NDVI为归一化植被指数。

图5　生境质量空间分异特征影响因素的交互作用

Fig. 5　Interaction of influencing factors of spatially differentiation characteristics of habitat quality

土地利用类型∩降水（0.69）、土地利用类型∩气温（0.66）、土地利用类型∩海拔（0.65）和土地利用类型∩NDVI（0.62）的交互决定力较大；土地利用类型∩坡度（0.58）、降水∩NDVI（0.57）、土地利用类型∩人口密度（0.55）、降水∩气温（0.55）、土地利用类型∩GDP（0.54）、气温∩坡度（0.51）和海拔∩降水（0.50）的交互决定力次之；而人口密度∩GDP（0.24）的交互决定力作用最低。从图5中可以看出，任意2个因子间的交互决定力均高于单个因子的决定力，说明生境质量的空间分异格局受多个因素的综合影响。其中，土地利用类型与其他因子之间的交互决定力最为显著，这主要是生境质量的评估是基于土地利用类型的结果，生境质量空间特征主要受土地利用类型空间格局的影响。社会经济因素对生境质量的决定力较小，但与自然因素交互后，决定力显著提升，人口密度因子交互强度达到0.5526，说明自然因素显著增强了社会经济因素对生境质量的影响程度。

4　讨　论

本文基于土地利用数据，采用InVEST模型对渭河流域生境质量及其时空演变特征进行评估，并借助地形位指数和地理探测器模型揭示其生境质量的地形梯度效应与影响因素，可为区域生态保护及生态系统管理提供决策依据，有效缓解局部生境质量退化风险。研究结果表明，2000—2020年，渭河流域生境质量呈两极分化趋势，即生境质量局部下降，但整体呈现增加趋势，这与李子等[29]、黄鑫等[30]研究结果一致。一方面受到区域社会经济发展的影响，特别是以西安市为核心的关中平原城市群的迅速扩张，其对周边地区的“虹吸效应”导致该地区城镇用地面积持续扩张，大量农田被建设用地侵占，进而影响周围生境，致使生境退化加剧。另一方面，退耕还林还草等生态工程的实施，大量耕地转化为生境适宜度较高的林地，致使高等级生境面积增加，生境质量整体水平不断提高和改善。研究区生境质量上升和下降同时存在，但上升幅度大于下降幅度，生境质量整体呈现出上升趋势。这与在疏勒河流域[31]、黄河三角洲[32]和密歇根流域[33]的研究结果一致，说明土地利用类型是引起生境质量变化的重要原因。

地形是影响种群分布格局、维持群落多样性的重要因素[34]。渭河流域地形十分复杂，其土地利用方式受地形限制，形成了独特的人口和产业布局，在相关因素的耦合作用下导致渭河流域生境质量在各地形因子上均呈现出明显的层级分布特征[35]，地形梯度效应极为显著。高生境质量主要分布在林地、草地等生态资源富集的山区，且随地形梯度增加逐渐占据主导地位，而低生境质量主要分布在耕地和建设用地广布的平原地区，且在低地形梯度上分布指数最大，这与贾磊等[11]、刘园等[3]研究结果相同，主要原因是低地形梯度区域地势平坦，水热

条件适宜,耕地和建设用地分布集中,成为人口和经济发展的聚集中心,人类活动强度的愈演愈烈,加剧了对生态用地的侵占,致使该区域生境质量较低。而高地形梯度区域植被覆盖度高,主要是地形因素与自然条件的限制,人类干扰强度较小,生态系统较为稳定,生境质量水平较高。因此,要通过优化国土空间规划,严格管控城镇扩张,实现土地资源集约高效利用,并通过自然恢复和生态修复等措施改善生境质量;同时需要制定科学的生态修复规划,持续推进退耕工程,修复破损生境,提升生态系统服务功能,维护生境质量和区域生态安全。

本文基于InVEST模型,结合地形位指数和地理探测器模型分析了渭河流域生境质量时空演变格局,探讨了其地形梯度效应,揭示了其关键影响因素,研究结果与渭河流域生态环境相吻合,为渭河流域生态环境保护和区域可持续发展提供了重要参考依据。然而,渭河流域跨度较大,其生境质量的影响因素具有显著的空间异质性,未来需要加强不同空间尺度下生境质量关键影响因素的识别与探测,以便寻求更具针对性的生态系统管理途径。此外,尽管InVEST模型的生境质量模块发展已相对成熟,但其相关参数仍参考操作手册及相关研究,仍具有一定的主观性,未来需要加强对研究区生物多样性的实地检测,进一步修正和完善评估模型,为区域生态建设及其相关政策的制定提供更精准的参考依据。

5 结 论

(1) 2000—2020年渭河流域生境质量呈逐年上升趋势,年均增长0.128%,空间两极分化趋势明显,低等和高等生境质量区面积逐年增加,中等和良好生境质量区面积有所下降;从空间变化来看,生境质量改善区主要分布在北部和西部的黄土高原丘陵沟壑区,生境退化区主要集中分布在连片城镇化的关中平原区。

(2) 2000—2020年渭河流域生境质量分布具有显著的地形梯度效应,整体表现为生境质量随地形梯度的增加而上升;低等生境质量在低地形梯度上分布广泛,且退化程度较大,而高地形梯度区以高等生境质量分布为主,且生境质量呈稳定增长趋势。

(3) 土地利用类型是渭河流域生境质量空间分异的主要影响因素,降雨量和气温次之,而GDP和人口密度最低,说明自然因素对生境质量的影响程度大于社会经济因素,而且任意2个因子间的交互作用均高于单个因子的单独作用,说明生境质量的空间分异格局受多个因素的综合影响。

参考文献(References)

[1] Terrado M, Sabater S, Kramer B C, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning[J]. Science of the Total Environment, 2015, 540: 63-70.

[2] Hillard E M, Nielsen C K, Groninger J W. Swamp rabbits as indicators of wildlife habitat quality in bottom land hardwood forest ecosystems[J]. Ecological Indicators, 2017, 79: 47-53, doi: 10.1016/j.ecolind.2017.03.024.

[3] 刘园, 周勇, 杜越天. 基于InVEST模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10): 2429-2440. [Liu Yuan, Zhou Yong, Du Yuetian. Study on the spatio-temporal patterns of habitat quality and its terrain gradient effects of the middle of the Yangtze River economic belt based on InVEST Model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(10): 2429-2440.]

[4] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 等. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2780-2796. [Zhao Xueyan, Ma Pingyi, Li Wenqing, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2780-2796.]

[5] 钟莉娜, 王军. 基于InVEST模型评估土地整治对生境质量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 250-255. [Zhong Lina, Wang Jun. Evaluation on effect of land consolidation on habitat quality based on InVEST model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 250-255.]

[6] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 160-178. [Zhang Xueru, Zhou Jie, Li Mengmei. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(1): 160-178.]

[7] Li Q, Zhou Y, Mary A C, et al. Spatio-temporal changes in wildlife habitat quality in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1980 to 2100 based on the InVEST model[J]. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12: 43-55.

[8] 陈淼, 苏晓磊, 黄慧敏, 等. 三峡库区河流生境质量评价[J]. 生态学报, 2019, 39(1): 192-201. [Chen Miao, Su Xiaolei, Huang Huimin, et al. Assessment of river habitat quality in the Three Gorges Reservoir Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): 192-

201.]

[9] Tang F, Fu M C, Wang L, et al. Land-use change in Changli County, China: Predicting its spatio-temporal evolution in habitat quality[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106719, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106719.

[10] 朱增云, 阿里木江·卡斯木. 基于地理探测器的伊犁谷地生境质量时空演变及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3408-3420. [Zhu Zengyun, Kasimu Alimujiang. Spatial-temporal evolution of habitat quality in Yili Valley based on geographical detector and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3408-3420.]

[11] 贾磊, 姚顺波, 邓元杰, 等. 2000—2020年陕西秦巴山区生境质量时空演变及其地形梯度效应[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(2): 398-413. [Jia Lei, Yao Shunbo, Deng Yuanjie, et al. Temporal and spatial evolution of habitat quality and its topographic gradient effect in Qinling-Daba Mountain area, Shaanxi Province, 2000—2020[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(2): 398-413.]

[12] 王军, 严有龙, 王金满, 等. 闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5837-5848. [Wang Jun, Yan Youlong, Wang Jinman, et al. Temporal-spatial variation characteristics and prediction of habitat quality in Min River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5837-5848.]

[13] 高庆彦, 潘玉君, 刘化. 基于InVEST模型的大理州生境质量时空演化研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(3): 402-408. [Gao Qingyan, Pan Yujun, Liu Hua. Spatial-temporal evolution of habitat quality in the Dali Bai Autonomous Prefecture based on the InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(3): 402-408.]

[14] 白立敏, 冯兴华, 孙瑞丰, 等. 生境质量对城镇化的时空响应——以长春市为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1267-1277. [Bai Limin, Feng Xinghua, Sun Ruifeng, et al. Spatial and temporal responses of habitat quality to urbanization: A case study of Changchun City, Jilin Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1267-1277.]

[15] 常玉旸, 高阳, 谢臻, 等. 京津冀地区生境质量与景观格局演变及关联性[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 848-859. [Chang Yuyang, Gao Yang, Xie Zhen, et al. Spatiotemporal evolution and spatial correlation of habitat quality and landscape pattern over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Environmental Science, 2021, 41(2): 848-859.]

[16] 徐彩仙, 巩杰, 李焱, 等. 基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4291-4301. [Xu Caixian, Gong Jie, Li Yan, et al. Spatial distribution characteristics of typical ecosystem services based on terrain gradients of Bailongjiang watershed in Gansu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4291-4301.]

[17] 徐省超, 赵雪雁, 宋晓谕. 退耕还林(草)工程对渭河流域生态系统服务的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3893-3904. [Xu Xingchao, Zhao Xueyan, Song Xiaoyu. Impacts of the returning farmland to forest (grassland) project on ecosystem services in the Weihe River Basin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3893-3904.]

[18] Yan H M, Liu F, Liu J Y, et al. Status of land use intensity in China and its impacts on land carrying capacity[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(4): 387-402.

[19] 石小伟, 冯广京, 苏培添, 等. 大都市郊区土地利用时空演变特征与生境质量评价[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 275-284. [Shi Xiaowei, Feng Guangjing, Su Peitian, et al. Spatiotemporal evolution of land use and habitat quality assessment in the suburbs of metropolitan[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 275-284.]

[20] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 160-178. [Zhang Xueru, Zhou Jie, Li Mengmei. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(1): 160-178.]

[21] 赵益祯, 曹建农, 张晓栋, 等. 宝塔区土地利用的地形梯度效应与空间格局[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1307-1315. [Zhao Yizhen, Cao Jiannong, Zhang Xiaodong, et al. Topographic gradient effect and spatial pattern of land use in Baota district[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1307-1315.]

[22] 周启刚, 陈丹. 重庆山地都市区土地利用地形特征分异研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 86-91. [Zhou Qigang, Chen Dan. Researched on the topographic differentiation of land use in Chongqing mountainous metropolitan area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(3): 86-91.]

[23] 宋戈, 王盼盼. 松嫩高平原县域土地利用空间格局地形梯度特征分析——以巴彦县为例[J]. 地理科学, 2017, 37(8): 1218-1225. [Song Ge, Wang Panpan. Spatial pattern of land use along the terrain gradient of county in Songnen High Plain: A case study of Bayan County[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(8): 1218-1225.]

[24] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[25] 王鹏, 王亚娟, 刘小鹏, 等. 基于景观结构的生态移民安置区生态风险评价——以宁夏红寺堡区为例[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2672-2682. [Wang Peng, Wang Yajuan, Liu Xiaopeng, et al. Ecological risk assessment of an ecological migrant resettlement region based on landscape structure: A case study of Hongsibu in Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): 2672-2682.]

[26] 郭帅, 裴艳茜, 胡胜, 等. 黄河流域植被指数对气候变化的响应及其与水沙变化的关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 1-7. [Guo Shuai, Pei Yanqian, Hu Sheng, et al. Response of vegetation

index to climate change and their relationship with runoff-sediment change in Yellow River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 1-7.]

[27] 程静, 王鹏, 陈红翔, 等. 半干旱区生态风险时空演变及其影响因素的地理探测——以宁夏盐池县为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1637-1648. [Cheng Jing, Wang Peng, Chen Hongxiang, et al. Geographical exploration of the spatial and temporal evolution of ecological risk and its influencing factors in semi-arid regions[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1637-1648.]

[28] 葛美玲, 封志明. 中国人口分布的密度分级与重心曲线特征分析[J]. 地理学报, 2009, 64(2): 202-210. [Ge Meiling, Feng Zhiming. Population distribution of China based on GIS: Classification of population densities and curve of population gravity centers[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(2): 202-210.]

[29] 李子, 张艳芳. 基于InVEST模型的渭河流域干支流生态系统服务时空演变特征分析[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 178-185. [Li Zi, Zhang Yanfang. Spatiotemporal evolution of ecosystem services in the main and tributaries of Weihe River Basin based on InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 178-185.]

[30] 黄鑫, 程文仕, 李晓丹, 等. 甘肃省生境质量变化的图谱特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3131-3140. [Huang Xin, Cheng Wenshi, Li Xiaodan, et al. Spectrum characteristics of habitat quality changes in Gansu Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 3131-3140.]

[31] Ma L B, Bo J, Li X Y, et al. Identifying key landscape pattern indices influencing the ecological security of inland river basin: The middle and lower reaches of Shule River Basin as an example[J]. Science of the Total Environment, 2019, 674: 424-438.

[32] Yang W, Jin Y W, Sun T, et al. Trade-offs among ecosystem services in coastal wetlands under the effects of reclamation activities[J]. Ecological Indicators, 2017, 92: 354-366.

[33] Brumm K J, Jonas J L, Prichard C G, et al. Land cover influences on juvenile rainbow trout diet composition and condition in Lake Michigan tributaries[J]. Ecology of Freshwater Fish, 2019, 28: 11-19.

[34] Li M Y, Zhou Y, Xiao P N, et al. Evolution of habitat quality and its topographic gradient effect in northwest Hubei Province from 2000 to 2020 based on the InVEST Model[J]. Land, 2021, 10(8): 857-882.

[35] 杨锁华, 胡守庚, 瞿诗进. 长江中游地区生态系统服务价值的地形梯度效应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 976-986. [Yang Suohua, Hu Shougeng, Qu Shijin. Terrain gradient effect of ecosystem service value in middle reach of Yangtze River, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3): 976-986.]

Spatiotemporal evolution of habitat quality in the Weihe River Basin and its topographic gradient effects and influencing factors

CHENG Jing[1], WANG Peng[2], CHEN Hongxiang[1], HAN Yonggui[1]

(1. School of Politics and History, Ningxia Normal University, Guyuan 756000, Ningxia, China; 2. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Habitat quality is an important basis for human well-being and regional sustainable development and has important practical significance for protecting regional biodiversity, improving regional ecosystem services, and building regional ecological security patterns. Based on the three-phase land use raster data from 2000, 2010, and 2020, this study comprehensively applied the InVEST model, topographic position index, distribution index, geographic detector, and spatial statistical analysis methods to analyze the spatiotemporal evolution characteristics and spatial distribution of habitat quality in the Weihe River Basin in China. The pattern and its topographic gradient effects and influencing factors were comprehensively analyzed. The results are as follows: (1) From 2000 to 2020, the habitat quality index of the Weihe River Basin exhibited a yearly increasing trend. The habitat quality index increased from 0.607 to 0.624, and the growth rate was 2.463%. It showed a polarized distribution pattern in space. The area of low habitat quality and high habitat quality continued to increase, whereas the area of medium and good habitat quality decreased. (2) The spatial distribution pattern of habitat quality in the Weihe River Basin was significantly affected by topographic factors, with a significant topographic gradient effect. It is extensively distributed on the topographic gradient, and its distribution index is the highest, whereas high habitat quality occupies a dominant position on the high topographic gradient. (3) From the perspective of different influencing factors, the land use type is the main reason for the spatial differentiation pattern of habitat quality in the Weihe River Basin. Influencing factors and the interaction of any two factors on the spatial differentiation of habitat quality have a greater impact than the independent effect of a single driving factor. Among them, the interactive determinants of land use type and natural factors such as rainfall, temperature, altitude, and normalized vegetation index are >0.6. The research results can provide scientific theoretical and decision support for the sustainable development of the Weihe River Basin, as well as ecological protection and high-quality development.

Key words: habitat quality; InVEST model; terrain gradient effect; influencing factors; geographic detector; Weihe River Basin